



## Vérification de propriétés temporelles à la volée

Laurent Kaiser

► **To cite this version:**

Laurent Kaiser. Vérification de propriétés temporelles à la volée. RENPAR'10 - Rencontres Francophones du Parallélisme, 1998, Strasbourg/France, pp.210-213, 1998. <inria-00098698>

**HAL Id: inria-00098698**

**<https://hal.inria.fr/inria-00098698>**

Submitted on 26 Sep 2006

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Vérification de propriétés temporelles à la volée \*

Laurent KAISER  
CRIN, Bâtiment LORIA, Campus Scientifique BP 239  
54506 Vandoeuvre les Nancy, France.  
E-mail : lkaiser@loria.fr

---

### Résumé

De plus en plus de systèmes intègrent des contraintes temporelles dans leur spécification. Il est important de pouvoir vérifier qu'une ou plusieurs propriétés désirées sont bien respectées. Néanmoins, cette vérification est confrontée au problème de l'explosion combinatoire engendrée par les approches exhaustives. C'est dans le but d'éviter cette explosion et donc de pouvoir traiter des problèmes plus complexes que nous présentons dans cet article une méthode de vérification à la volée de propriétés temporelles.

**Mots-clés :** Vérification à la volée, contrainte temporelle, automate à entrées-sorties

---

### 1. Introduction

La vérification de propriétés temporelles est une problématique très présente dans les domaines de l'interopérabilité, de la communication, des systèmes embarqués, etc. Il est important, si l'on désire utiliser des contraintes temporelles dans une spécification de pouvoir vérifier qu'une ou plusieurs propriétés désirées sont bien vérifiées. Une préoccupation bien connue est la détermination de l'existence de comportements satisfaisant une propriété donnée. On distingue des approches basées sur la simulation, ainsi que des approches basées sur le calcul exhaustif d'un graphe de comportement. Mais, la vérification est confrontée au problème d'explosion combinatoire du graphe exploré. Les techniques de vérification à la volée permettent d'analyser une propriété sans avoir à construire le graphe en totalité [4]. Sokolsky [6] indiquait que ces techniques n'avaient jamais été appliquées à des systèmes temps réel auparavant et proposait une méthode basée sur des extensions temporelles du mu-calcul. Nos travaux s'appuient sur des modèles d'automates temporisés, sur une méthode de vérification exhaustive que nous avons développée [5] ainsi que sur les résultats de J. Toussaint [7], [8]. Nous proposons dans cet article une nouvelle technique de vérification de propriétés temporelles. Cette méthode permet de trouver à la volée l'existence de chemins satisfaisants une propriété donnée en diminuant dans certains cas l'explosion combinatoire.

Dans cet article, nous ferons tout d'abord un bref rappel sur le modèle que nous avons utilisé : les *TIOSM*. Ce modèle fait partie de la famille des automates temporisés d'Alur et Dill [1], et permet de décrire les systèmes à entrées-sorties. Nous présenterons ensuite l'algorithme de vérification à la volée de propriétés temporelles que nous avons développé.

### 2. Modélisation

Dans cette section, nous allons tout d'abord présenter le modèle des *TIOSM*, puis nous verrons comment modéliser une propriété, et enfin, nous définirons les règles utilisées pour rechercher la propriété.

#### 2.1. Rappel sur les *TIOSM* (Timed Input Output State Machine)

**Définition 2.1** *Un *TIOSM* [5] est un tuple  $M = (S(M), L(M), C(M), s_0(M), C_0(M), T(M))$  où  $S(M)$  est un ensemble fini et non vide d'états,  $L(M)$  est un ensemble fini d'interactions,  $C(M)$  est un ensemble fini d'horloges,  $s_0(M)$  est l'état initial de  $M$ ,  $C_0(M) \subseteq C(M)$  est un ensemble fini d'horloges remises à zéro lors de l'initialisation et  $T(M)$  est un ensemble fini de transitions.*

*Une transition  $t \in T(M)$  est définie par  $t = (s(t), m, D(t), Z(t), d(t))$  où  $s(t)$  est l'état source,  $m \in (\{!, ?\} \times L(M)) \cup \{\tau\}$  est une action interne ( $\tau$ ), une émission ( $!a$ ) ou une réception ( $?b$ ),  $D(t)$  est un*

---

\* Nous remercions Ousmane KONE pour la direction de ces travaux.

ensemble fini de contraintes temporelles du type  $c \in [a, b]$  (avec  $c \in C(M)$ ,  $(a, b) \in (\mathbb{Q} \times \mathbb{Q})$ ),  $Z(t)$  est un ensemble fini d'horloges à remettre à zéro après le tir de  $t$ , et,  $d(t)$  est l'état destination (cf. figure 1).

## 2.2. Modélisation avec les TIOSM

Pour pouvoir vérifier une propriété  $P$  dans une spécification  $S$ , nous allons tout d'abord représenter  $S$  sous la forme d'un TIOSM  $T_s$ , puis faire de même pour  $P$  en la représentant par le TIOSM  $T_p$ .

Dans la suite de cet article nous considérerons qu'une propriété est vérifiée si on peut atteindre un état d'acceptation de l'automate représentant cette propriété.

### Définition 2.2 (Etat d'acceptation)

On définit  $\text{Accept}(T_p)$  ( $\text{Accept}(T_p) \subseteq S(T_p)$ ), l'ensemble fini des états d'acceptation du TIOSM  $T_p$  correspondant aux états pour lesquels la propriété  $P$  est satisfaite (dans la figure 1, on définit l'ensemble des états d'acceptation de  $TP$  par :  $\text{Accept}(TP) = \{S10\}$ ).

## 2.3. Règles de construction

Pour permettre la recherche d'un chemin dans  $T_s$  vérifiant la propriété  $T_p$ , nous allons définir des règles permettant de construire le TIOSM  $T_{s||p} = T_s || T_p$  (avec  $S(T_{s||p}) \subseteq S(T_s) \times S(T_p)$ ,  $L(T_{s||p}) = L(T_s) \cup L(T_p)$ ,  $C(T_{s||p}) = C(T_s) \cup C(T_p)$  et  $C_0(T_{s||p}) = C_0(T_s) \cup C_0(T_p)$ ). Cette opération de construction est proche de la notion de composition de CCS, et, les règles ci-dessous ont été écrites de manière à pouvoir trouver la propriété  $P$  quel que soit l'endroit où elle se trouve dans la spécification  $S$  :

- Règle  $R_0$  : Cette règle sert à construire le premier état de  $T_{s||p}$  à partir des états initiaux de  $T_s$  et  $T_p$  (on considère que les deux TIOSM commencent en même temps).

$$s_0(T_{s||p}) = (s_0(T_s), s_0(T_p)) \in S(T_{s||p})$$

- Règle  $R_1$  : Cette règle traite les cas où l'on ne peut tirer des transitions que dans  $T_s$ . En fait, il n'est pas possible d'avancer dans  $T_p$ .

$$\frac{(s_1, s_2) \in S(T_{s||p}) \wedge (s_1, \mu, D_1, Z_1, s'_1) \in T(T_s) \wedge (s_2, \mu, D_2, Z_2, s'_2) \notin T(T_p)}{(s'_1, s_2) \in S(T_{s||p}) \wedge ((s_1, s_2), \mu, D_1, Z_1, (s'_1, s_2)) \in T(T_{s||p})}$$

- Règle  $R_2$  : Cette règle sert lorsque l'on peut tirer simultanément une transition de  $T_s$  et  $T_p$ . On se trouve en fait dans la situation où une partie de la propriété  $P$  est vérifiée.

$$\frac{(s_1, s_2) \in S(T_{s||p}) \wedge (s_1, \mu, D_1, Z_1, s'_1) \in T(T_s) \wedge (s_2, \mu, D_2, Z_2, s'_2) \in T(T_p)}{\frac{(s'_1, s'_2) \in S(T_{s||p}) \wedge ((s_1, s_2), \mu, D_1 \cup D_2, Z_1 \cup Z_2, (s'_1, s'_2)) \in T(T_{s||p}) \wedge (s'_1, s_2) \in S(T_{s||p}) \wedge ((s_1, s_2), \mu, D_1, Z_1, (s'_1, s_2)) \in T(T_{s||p})}{(s'_1, s'_2) \in S(T_{s||p}) \wedge ((s_1, s_2), \mu, D_1 \cup D_2, Z_1 \cup Z_2, (s'_1, s'_2)) \in T(T_{s||p}) \wedge (s'_1, s_2) \in S(T_{s||p}) \wedge ((s_1, s_2), \mu, D_1, Z_1, (s'_1, s_2)) \in T(T_{s||p})}}$$

## 3. Méthode de vérification à la volée

La méthode de vérification temporelle que nous avons développée s'inspire de l'approche énumérative des RdPT. Nous y avons ajouté les techniques de vérification à la volée que nous avons étendues pour pouvoir prendre en compte des contraintes temporelles. Nous allons tout d'abord faire un rappel sur la méthode énumérative puis, nous présenterons notre algorithme.

### 3.1. Rappel sur la méthode énumérative

L'approche énumérative [2], [3], [7] consiste à construire l'ensemble du graphe d'accessibilité à partir d'une classe d'états initiale  $C_0 = (s_0(T_s), s_0(T_p), Q_0)$ .

**Définition 3.1 (Classe d'états)** Une classe d'états  $C = (s_1, s_2, Q)$  est définie par :

- $s_1$  est l'état courant de l'automate  $T_s$ , et,  $s_2$  est l'état courant de l'automate  $T_p$
- $Q$  est un système d'inéquations permettant de conserver les relations temporelles entre les diverses transitions sensibilisées dans l'état global  $(s_1, s_2) \in S(T_{s||p})$ . Ce système est composé de deux types d'inéquations ( $\theta(t)$  est l'instant de tir de la transition  $t$ ):

$$\alpha \leq \theta(t) \leq \beta : \text{temps restant pour tirer } t$$

$\theta(t) - \theta(t') \leq \Delta$  : plus grande différence entre les instants de tir de  $t$  et de  $t'$

(Le système  $Q_0$  contient les données temporelles sur les instants de tir des transitions lorsque l'on se trouve dans l'état global  $(s_0(T_s), s_0(T_p))$ )

Le calcul de la totalité du graphe des classes d'états sera terminé lorsqu'il ne restera plus de transitions tirables à traiter, ou, lorsque l'on ne retrouvera que des classes d'états déjà atteintes.

### 3.2. Algorithme de vérification à la volée

L'algorithme de notre méthode de vérification de propriétés temporelles à la volée utilise un mécanisme de parcours en profondeur avec retour arrière en cas d'échec.

Pour cela, on calcule tout d'abord la première classe d'état  $C_0$ . Ensuite à partir d'une classe d'états  $C$ , on construit et on parcourt en profondeur le graphe des classes d'états :

- Si on atteint une classe d'états  $C' = (s_s, s_p, Q)$  où  $s_p \in \text{Accept}(T_p)$  alors on aura trouvé un chemin vérifiant la propriété  $P$  (Le chemin est:  $C_0 \rightarrow \dots \rightarrow C_i \rightarrow \dots \rightarrow C \rightarrow C'$ ).
- Si on atteint une classe d'états déjà calculée, on en recherche une autre
- Si on ne peut atteindre une nouvelle classe d'états, on retourne en arrière (classe d'états  $C$ )
- Si toutes les classes d'états ont été calculées, alors la propriété  $P$  n'est pas vérifiée dans  $S$

#### Notation 3.1

- $T_s$  et  $T_p$  sont les TIOSM modélisant respectivement la spécification et la propriété à vérifier
- $\text{RelationTemporelle}(\{(s^s, s^p), q^c\}, \mu, (s_2^s, s_2^p))$  calcule le nouveau système d'inéquations à partir de l'ancien système  $q^c$  et des contraintes temporelles associées au passage de  $(s^s, s^p)$  à  $(s_2^s, s_2^p)$
- $\text{ExisteSolution}((s^s, s^p), q^c, (s_2^s, s_2^p))$  vérifie que les contraintes temporelles pour passer de  $(s^s, s^p)$  à  $(s_2^s, s_2^p)$  peuvent être vérifiées dans  $q^c$
- $\text{Successeur}((s^s, s_p))$  cherche l'ensemble des états globaux atteignables à partir de l'état global  $(s^s, s^p)$  en respectant les règles  $R_0, R_1$  et  $R_2$
- $P$  est une pile contenant l'ensemble des classes d'états à traiter
- $\text{Calcule}$  est l'ensemble des classes d'états déjà calculées
- $\text{Chemin}$  est un chemin permettant de vérifier la propriété  $P$

```

P := ∅ ; Calcule := ∅ ; Chemin := ∅
q0c := RelationTemporelle(∅, ∅, (s0(Ts), s0(Tp)))
Ajout({(s0(Ts), s0(Tp)), q0c}, Calcule)
Empile({(s0(Ts), s0(Tp)), ∅}, Chemin)
Empile({(s0(Ts), s0(Tp)), q0c, Successeur((s0(Ts), s0(Tp)))}, P)
* Itération tant qu'il reste des classes d'états à traiter *
Tantque (P ≠ ∅) faire
    {(ss, sp), qc, l} := Tete(P)
    Si (l ≠ ∅) alors
        {(s2s, s2p), μ} := Tete(l)
        Depile(l)
        q2c := RelationTemporelle({(ss, sp), qc}, μ, (s2s, s2p))
        Si ({(s2s, s2p), q2c} ∉ Calcule ∧ ExisteSolution((ss, sp), qc, (s2s, s2p)) alors
            * On obtient une nouvelle classe d'états {(s2s, s2p), q2c} *
                Empile({(s2s, s2p), q2c, Successeur((s2s, s2p))}, P)
                Empile({(s2s, s2p), μ}, Chemin)
            * Si le s2p est un état d'acceptation, alors on a vérifié la propriété *
                Si (s2p ∈ Accept(Tp)) alors Retourne(Chemin)
            FinSi
        Sinon
            Depile(P)
            Depile(Chemin)
        FinSi
    Fin Tantque
* La propriété n'a pu être vérifiée *
Retourne(∅)

```

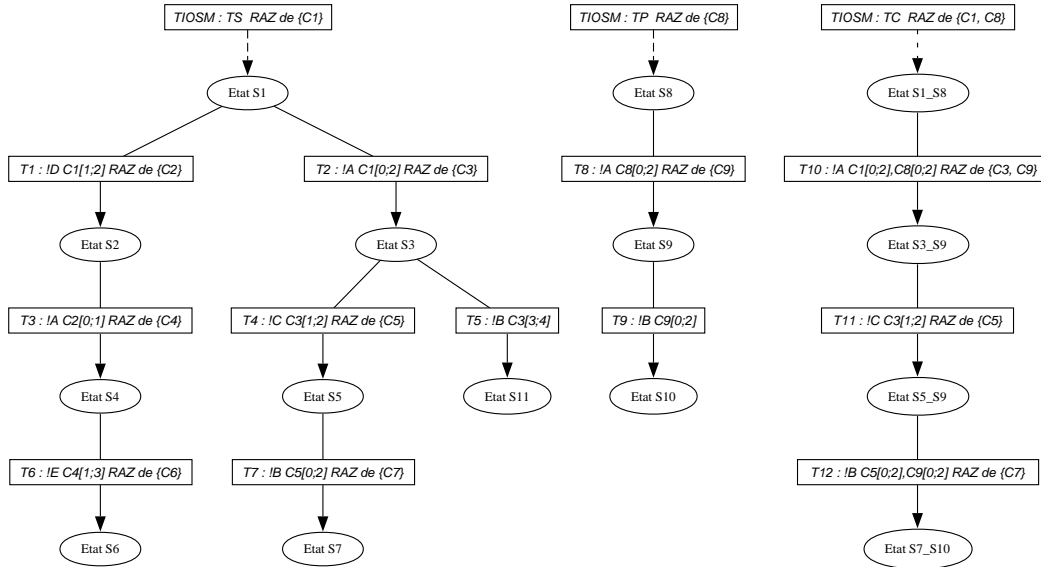


FIG. 1:  $TS$  : représentant la spécification  $S$ ,  $TP$  : représentant la propriété  $P$  et  $TC = TS || TP$  : représentant un chemin vérifiant  $P$  dans  $S$

#### 4. Conclusion

L'approche exhaustive utilisée pour vérifier des propriétés temporelles nécessite énormément de ressources car il faut calculer l'ensemble du graphe d'accessibilité. C'est pourquoi, nous avons proposé une méthode de vérification à la volée de propriétés temporelles qui tente d'éviter l'explosion combinatoire engendrée par l'utilisation d'une méthode exhaustive puisqu'elle ne consiste pas à calculer et mémoriser l'ensemble du graphe d'accessibilité. L'algorithme que nous avons présenté a été implanté dans l'outil *Xtiosm* [9], qui permet aussi de réaliser d'autres opérations sur les TIOSM (composition et validation de TIOSM, ...). Nous nous intéressons à modéliser et valider des protocoles à contraintes temporelles complexes.

#### Bibliographie

1. R. Alur, D.L. Dill. The Theory of Timed Automata. *Theoretical Computer Science*, 126(2), 1994.
2. B.Berthomieu, M.Diaz. Modeling and Verification of Time Dependent Systems Using Time Petri Nets. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 3(17), 03/1991, pp 259-273.
3. L. Gallon. Le modèle réseaux de Petri temporisés stochastiques : extensions et applications Thèse de doctorat, Toulouse, 1997.
4. C. Jard, T. Jérón, J.C. Fernandez, L. Mounier. On the fly verification of finite transition systems. *Formal Methods in System Design*, 1:251-273, 1992
5. L. Kaiser, O. Koné. Une méthode de vérification d'interopérabilité temporelle. Colloque francophone REN-PAR'9, Lausanne, 1997
6. O.V. Sokolsky, S.A. Smolka. Local Model Checking for Real-Time Systems. *Computer Aided Verification*. pp 211-224, Liège, 1995.
7. J. Toussaint. Modélisation temps réel réparties pour la validation de propriétés temporelles, Méthodologie de construction de modèles et algorithmes de validation. Thèse de doctorat, INPL, Nancy, 1997.
8. J. Toussaint, F. Simonot-Lion. Vérification formelle de propriétés temporelles d'une application distribuée temps réel. *Real-Time Systems, RTS'97*, pages 53-66, Paris (France), janvier 1997.
9. L. Kaiser. Interopérabilité temporelle à l'aide d'automates temporisés à entrée/sortie. Mémoire de DEA, Université Henri Poincaré, Nancy, 1996.